

Essais et simulations des âmes Nomex sous des sollicitations de type statique et fatigue

Experimental tests and prediction of Nomex cores under static and fatigue loadings

Laurent Gornet¹, Gilles Marckmann¹, Syed Kamran-Ali¹, Steven Marguet²

Jean-Pierre Regoin¹

¹GeM UMR CNRS 6183, École Centrale de Nantes 1 Rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes Cedex 3

e-mail : laurent.gornet@ec-nantes.fr, Gilles.marckamn@ec-nantes.fr,
syed.kamran-ali@ec-nantes.fr, Jean-Pierre.Regoin@ec-nantes.fr

²Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse (LGMT), Université Paul Sabatier – 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse, Cedex 4

e-mail : steven.marguet@lgmt.ups-tlse.fr

RESUME

Une démarche expérimentale combinée à une approche numérique est mise en œuvre afin de déterminer les propriétés mécaniques en cisaillement hors plan des âmes nids d'abeilles Nomex® lors de sollicitations de fatigue. La méthode proposée est élaborée à partir d'essais mécaniques de cisaillement hors plan réalisés sur des éprouvettes quatre blocs assurant une cinématique de glissement pur. Cette démarche déjà appliquée avec succès pour des chargements quasi-statiques peut être étendue pour des chargements de fatigue.

ABSTRACT

An experimental and numerical approach is presented to determine the out of plane mechanical properties in shear for Nomex® honeycomb materials under fatigue loading. The proposed method is developed from experimental tests performed on four blocked specimens loaded in pure shear. This approach is already successfully tested for quasi-static problems and in this work is effectively applied to fatigue problems.

MOTS CLES : nids d'abeilles, âmes Nomex®, homogénéisation, modélisation éléments finis, compression, cisaillement, essais, carbone epoxy.

KEYWORDS : honeycombs, Nomex Cores, homogenization, finite element modelling, compression, shear, testing, carbon epoxy.

1. Introduction

L'objet de cette étude est de mieux comprendre et de mieux modéliser le comportement mécanique des âmes nids d'abeilles Nomex® utilisées dans la réalisation des structures sandwich à peaux carbone époxy constituant les voiliers de courses transocéaniques (Gornet et al. 2004, 2006). Le comportement mécanique des différents matériaux élémentaires constituant ces voiliers doit être validé afin d'intégrer dans les simulations éléments finis des propriétés mécaniques en adéquation avec le mode d'élaboration de ces structures (Martin et al. 2006). Une base canonique de trois essais mécaniques associée à des simulations éléments finis est proposée pour déterminer l'ensemble des propriétés mécaniques tridimensionnelles des âmes nids d'abeilles Nomex®. Cette approche a été initialement établie pour des caractérisations quasi-statiques qui sont présentées dans (Gornet et al. 2007). La démarche expérimentale proposée est fondée sur, une éprouvette de cisaillement pur sens L, une éprouvette de cisaillement pur sens W et une éprouvette de compression hors plan normalisée ASTM C365. Les éprouvettes de cisaillement développées permettent d'assurer une cinématique de glissement pur. L'éprouvette comprend quatre blocs d'âmes nids d'abeilles Nomex® (figure 1). La géométrie des éprouvettes de cisaillement hors plan a été déterminée à partir de nombreuses simulations éléments finis destinées à vérifier les effets d'échelles induits par la microstructure de ces matériaux. Le volume élémentaire représentatif de ces matériaux possédant trois plans de symétries orthogonaux conduit à un comportement homogénéisé orthotrope. Il convient de rappeler que les modes de rupture de ces matériaux sont fortement liés à des phénomènes de perte de stabilité (Gibson et Ashby 1988). La destruction des âmes est due à des phénomènes de flambement conduisant à des détériorations plus ou moins progressive de l'éprouvette (Gornet et al. 2004, 2006, 2007).

La géométrie des éprouvettes de cisaillement hors plan permet d'évaluer les performances des âmes Nomex® pour des chargements mécaniques de type quasi-statique ou de fatigue. Le choix de l'éprouvette a été établie à partir d'études éléments finis menées sur des microstructures représentant les âmes Nomex® avec ou sans défauts géométriques (figure 1)

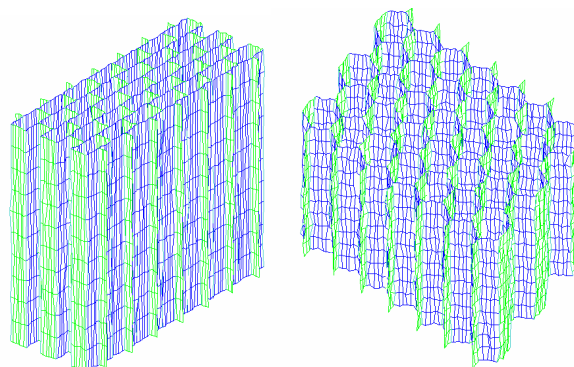


Fig. 1 : Modèle Cast3M de Nomex® ECA-R et ECA 6,4 mm 64 kg.m⁻³.
ECA-R and ECA 6,4 mm 64 kg.m⁻³ Nomex® geometries

2. Campagnes expérimentale statique et fatigue

Les investigations expérimentales ont plus particulièrement portées sur deux types de nids d'abeilles Nomex®. Une géométrie de cellules hexagonale (ECA) et une version rectangulaire sur-expansée ECA-R. Les deux âmes testées sont de diamètre 6,4 mm et de masse volumique 64 kg.m⁻³. Les essais mécaniques sont réalisés sur une hauteur de 12.7mm pour les (ECA) et sur une hauteur moins standard de 40 mm pour les (ECA-R). Les essais ont été réalisés sur des machines de traction hydraulique MTS de fatigue. Les essais mécaniques sont menés sur des éprouvette ayant une épaisseur de l'âme « t » de 12.7mm pour les (ECA) et de 40 mm pour les (ECA-R).

1.1 Essais mécaniques quasi-statiques

Les propriétés mécaniques déterminées à l'issue de la phase expérimentale sont : le module de compression (E_T), la contrainte et la déformation à l'instabilité, les deux modules de cisaillement hors plan (G_L et G_W) ainsi que les déformations et contraintes de rupture associées. Les essais sont présentés dans (Gornet et al. 2006). Il convient de noter que lors des essais mécaniques de cisaillement hors plan, la présence d'un effet d'échelle a été mise en évidence expérimentalement par l'utilisation de plusieurs dimensions d'éprouvettes.

2.1 Essais de cisaillement hors plan en fatigue

En fatigue, comme en quasi statique, la caractérisation mécanique en cisaillement hors plan est élaborée à partir d'une éprouvette comprenant quatre blocs de nids d'abeilles Nomex®. Ces éprouvettes quatre blocs assurent une cinématique de cisaillement pure pour chacun des quatre blocs (figure 1). Ces essais permettent de mesurer les deux modules de cisaillement hors plan (G_L et G_W) ainsi que les contraintes et déformations à ruptures associées. Les courbes Force déplacement établies à partir des essais de cisaillement sont présentées (figures 4 et 5). Les essais mécaniques sont réalisés à une fréquence de 0.5Hz. A titre d'illustration, pour une éprouvette de 40mm d'épaisseur constituée de quatre blocs de 50 cellules de matériau ECA-R 6,4mm, 64 Kg m^{-3} (longueur L), on enregistre 3 cellules entaillées à 1628 cycles et 6 cellules entaillées à 3214 cycles (figure 2). La rupture a lieu dans l'âme Nomex mais elle peut également se propager à l'interface carbone. La simulation de l'évolution de la séparation entre l'âme et la peau de carbone est réalisée avec un modèle d'interface cohésif de fatigue (Gornet et al. 2009)

Le critère de fin de vie de l'éprouvette suite à la fissuration de fatigue est proposé à partir d'une analyse de perte de raideur de l'éprouvette

$$K(N) = \frac{F_{\max}(N)}{U_{\max}(N)}$$

K représente la raideur, N le nombre de cycles, $U_{\max}(N)$ et $F_{\max}(N)$ représentent respectivement le déplacement imposé et la force maximum mesurée lors des cycles N . On peut écrire l'évolution de la raideur sous la forme

$$K(N) = K_0 \log(N) + K_1$$

K_0 et K_1 représentent des paramètres matériaux. En écrivant la dérivé de l'expression de la raideur par rapport au nombre de cycle

$$\frac{dK}{dN} = \frac{K_0}{N}$$

Le critère de fin de vie de l'éprouvette est atteint lorsque $N \frac{dK}{dN}$ n'est plus une constante

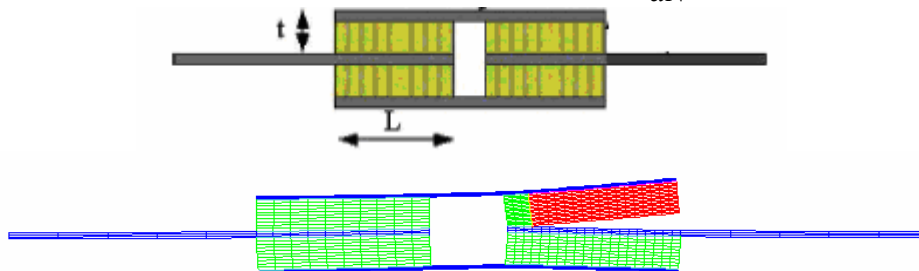


Fig. 2 : Modèle EF de cisaillement quatre blocs, interface endommageables.
Four block Shear sample FE specimen for damage fatigue predictions

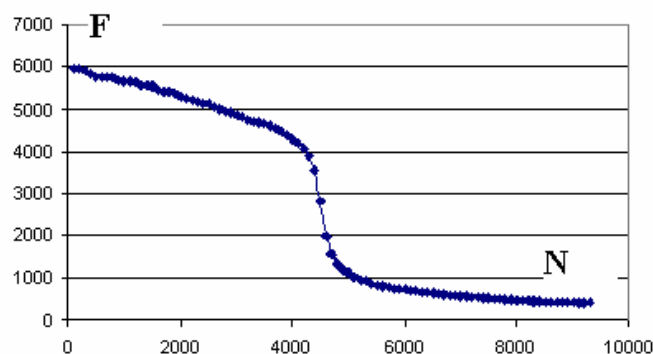


Fig. 3 : Cisaillement de fatigue (sens L), Nomex ECA-R 6,4mm, 64 Kg m^{-3} (40mm).
Nomex ECA-R 6,4mm, 64 Kg m^{-3} (40mm), L Shear fatigue tests

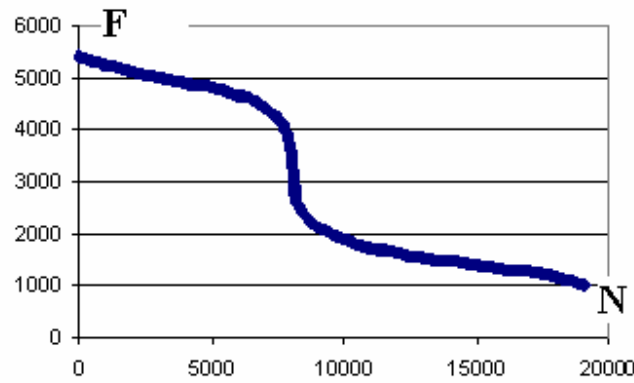


Fig. 4 : Cisaillement de fatigue (sens L), Nomex ECA 6,4mm, 64 Kg m⁻³ (12.7 mm).
Nomex ECA 6,4mm, 64 Kg m⁻³ (12.7mm), Shear fatigue tests

La simulation de la propagation de la fissure sous des chargements de fatigue peut être réalisée à l'aide d'un modèle d'interface élastique endommageable pour des matériaux carbone époxy (Gornet et al. 2008). La rupture de l'interface âme peau peut également être simulée avec ce type de modèle.

3. Critère de rupture des âmes Nomex

Les propriétés mécaniques tridimensionnelles ainsi que les contraintes ultimes de stabilité des âmes Nomex sont déterminées à l'aide du logiciel « Nidacore » (Gornet et al. 2004, 2006). Ce code prototype est fondé sur la mise en œuvre de la théorie de l'homogénéisation des milieux périodiques. Les simulations permettent notamment d'évaluer les contraintes de rupture sous l'action de chargements complexes quasi-statiques sans réaliser d'essais mécaniques supplémentaires. Ces simulations numériques sont menées en interaction avec les essais mécaniques issus de la base canonique permettant l'identification expérimentale des propriétés mécaniques en cisaillement hors plan et en écrasement. Les contraintes ultimes simulées sont déterminées à partir des modes de flambement du VER. Ces contraintes sont conformes aux résultats expérimentaux obtenus par (Petras et Sutcliffe 1999) à partir d'un dispositif ARKAN. Les propriétés mécaniques des matériaux ECA 4.8-48 (51) et ECA-R 4.8-48 (51) simulés en écrasement et cisaillement combinés sont données Tab 1. Un multi-critère de rupture exprimé dans la base d'orthotropie du matériau est proposé afin de définir une enveloppe d'utilisation de ces matériaux. Une version simplifiée du critère peut également être employée.

3.1 Critère de rupture chargements combinés

Nous proposons un multi critère de rupture écrit dans la base d'orthotropie de l'âme nids d'abeilles Nomex®. Le critère est construit pour des chargements combinés en cisaillement et écrasement suivant les plans

$$\sigma_{13} - \sigma_{23}, \sigma_{13} - \sigma_{33}, \sigma_{23} - \sigma_{33}$$

L'enveloppe de rupture dans le plan $\sigma_{13} - \sigma_{23}$:

$$\text{Rupture si } f_{c_{13-23}} = 1 \text{ avec } f_{c_{13-23}} = \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13c}} \right)^\alpha + \left(\frac{\sigma_{23}}{\sigma_{23c}} \right)^\alpha$$

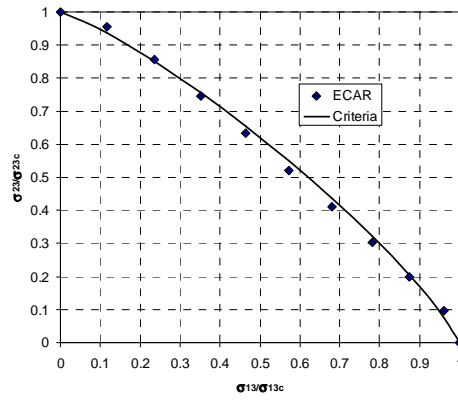


Fig. 5 : Enveloppe de rupture $\sigma_{23} - \sigma_{13}$, Nomex ECA, ECA-R 48 Kg m-3

$\sigma_{23} - \sigma_{13}$ Stress failure predictions for ECA and ECA-R 48 Kg m-3

L'enveloppe de rupture dans le plan $\sigma_{13} - \sigma_{33}$:

Rupture si $fc_{13-33} = 1$ avec $fc_{13-33} = \min(g_{c13}, f_{c13})$

$$g_{c13}(\sigma_{13}, \sigma_{33}) = \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13c}} \right)^{\alpha_{13}} + \left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{33c}} \right)^{\alpha_{13}}$$

$$f_{c13}(\sigma_{13}, \sigma_{33}) = \gamma_{13} \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13c}} \right)^{\alpha_{13}} + \left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{33c}} \right)^{\alpha_{13}}$$

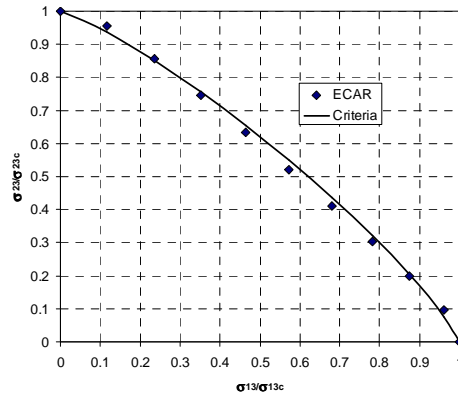


Fig. 6 :: Enveloppe de rupture $\sigma_{23} - \sigma_{13}$, Nomex ECA, ECA-R 48 Kg m-3

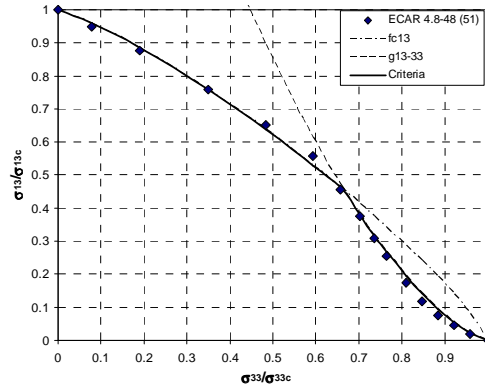
$\sigma_{23} - \sigma_{13}$ Stress failure predictions for ECA and ECA-R 48 Kg m-3

L'enveloppe de rupture dans le plan $\sigma_{13} - \sigma_{33}$:

Rupture si $fc_{13-33} = 1$ avec $fc_{13-33} = \min(g_{c13}, f_{c13})$

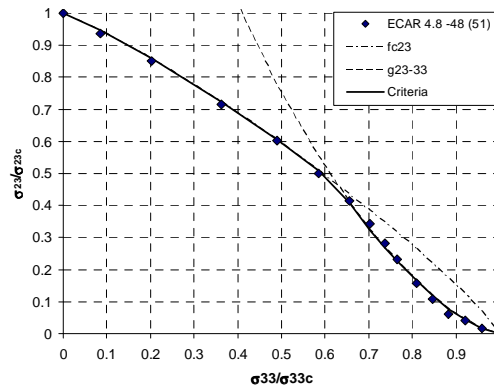
$$g_{c13}(\sigma_{13}, \sigma_{33}) = \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13c}} \right)^{\alpha_{13}} + \left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{33c}} \right)^{\alpha_{13}}$$

$$f_{c13}(\sigma_{13}, \sigma_{33}) = \gamma_{13} \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13c}} \right)^{\alpha_{13}} + \left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{33c}} \right)^{\alpha_{13}}$$

Fig. 7 :: Enveloppe de rupture $\sigma_{13} - \sigma_{33}$, Nomex ECA, ECA-R 48 Kg m-3 $\sigma_{13} - \sigma_{33}$ Stress Failure Criteria for ECA-R 48 Kg m-3L'enveloppe de rupture dans le plan $\sigma_{23} - \sigma_{33}$:Rupture si $fc_{23-33} = 1$ avec $fc_{23-33} = \min(g_{c23}, fc_{23})$

$$g_{c23}(\sigma_{23}, \sigma_{33}) = \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13c}} \right)^{\alpha_{23}} + \left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{33c}} \right)^{\alpha_{23}}$$

$$fc_{23}(\sigma_{23}, \sigma_{33}) = \gamma_{23} \left(\frac{\sigma_{23}}{\sigma_{23c}} \right)^{\alpha_{23}} + \left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{33c}} \right)^{\alpha_{23}}$$

Fig. 8 :: Enveloppe de rupture $\sigma_{23} - \sigma_{33}$, Nomex ECA, ECA-R 48 Kg m-3 $\sigma_{23} - \sigma_{33}$ Stress Failure Criteria for ECA-R 48 Kg m-3

4.1 Critère de rupture simplifié en chargements combinés

Le multi-critère de rupture peut être simplifié, en une version linéaire, cependant l'identification doit être réalisée avec précaution afin de demeurer conservative. La non convexité du critère pour des chargements cisaillement compression dominés par de l'écrasement hors plan (effet de slamming pour les voiliers) rend l'identification des critères simplifiés conservatifs (figures 7).

$$\left(\frac{\sigma_{23}}{\sigma'_{23c}} \right) + \left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma'_{33c}} \right) = 1 \quad \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma'_{13c}} \right) + \left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma'_{33c}} \right) = 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma'_{13c}} \right) + \left(\frac{\sigma_{23}}{\sigma'_{23c}} \right) = 1$$

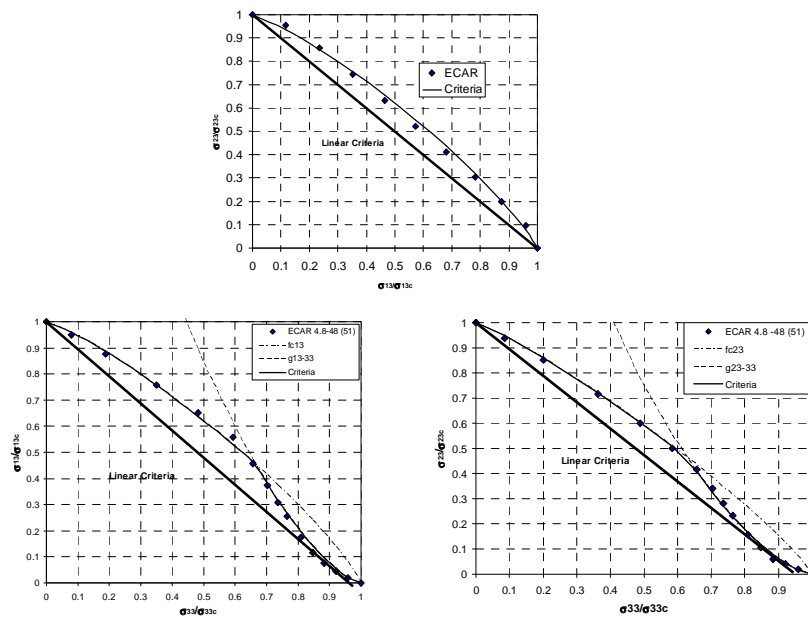


Figure 7 : Enveloppes de rupture linéaire ECA-R 48 Kg m-3
Linear Stress Failure Criteria for ECA-R 48 Kg m-3

Matériau	ECA 4.8-48 (51)				ECA-R 4.8-48 (51)			
Catégorie	Minimum		Typique		Minimum		Typique	
Résultats	FE	EC	FE	EC	FE	EC	FE	EC
G_{23}	34.4	34	41.9	40	19.9	18	25	24
G_{13}	22.5	22	27.4	28	34.2	36	42.97	44
G_{12}	1.76	-	2.15	-	.71	-	.89	-
E_{33}	164.1	-	199.9	-	185.6	-	233.6	-
σ_{33c}	1.3	2.6	1.58	2.85	1.37	2.3	1.72	2.3
σ_{13c}	.49	.56	.594	.66	0.77	0.72	0.84	0.82
σ_{23c}	.82	.98	1.003	1.14	0.79	0.66	0.89	0.74

Tab 1. Propriétés mécaniques Euro-Composites et simulations (FE) des données

4. Conclusion

Un multi-critère de rupture est proposé pour les âmes Nomex® de forme hexagonale et rectangulaire. Les données expérimentales sont issues d'une base canonique de trois essais mécaniques associées à des simulations éléments finis permettant de déterminer l'ensemble des propriétés mécaniques tridimensionnelles quasi-statiques. L'approche expérimentale proposée est fondée sur, une éprouvette de cisaillement pur sens L, une éprouvette de cisaillement pur sens W et une éprouvette de compression hors plan ASTM. La démarche expérimentale menée en interaction avec des études sur le logiciel prototype Nidacore permet d'évaluer les contraintes de rupture sous l'action de chargements quasi-statiques complexes. Les essais de fatigue réalisés permettent d'estimer les contraintes maximums d'utilisation en cisaillement hors plan. La simulation de la propagation de la fissure sous des chargements de fatigue peut être réalisée à l'aide d'un modèle d'interface élastique endommageable

5. Bibliographie

- [1] Aminanda, Y B. Castanié, JJ Barrau, P. Thevenet, 2005 Experimental analysis and modeling of the crushing of honeycomb cores, *Applied Composite Materials*, pp. 213-227.
- [2] Euro-Composite 1999, Nids d'abeilles Nomex®, <http://www.euro-composites.com>
- [3] Gibson L. J., Ashby M.F., 1988 Cellular solids structures and properties, *Pergamon Press*. Oxford.
- [4] Gornet L., Marckmann G., Lombard M., 2004 Détermination des coefficients d'élasticité et de rupture d'âmes nids d'abeilles Nomex® : homogénéisation périodique et simulation numérique, *Mécanique Industrie*, pp. 595-604.
- [5] Gornet L., Marguet S., Marckmann G., 2006 Failure criteria and effective elastic properties of Nomex® honeycomb cores : modelling and experimental validation, *International Journal Computer Material & Continua*, Tech science Press, 4, 2.
- [6] Gornet L., Marguet S., Marckmann G., 2007 Modeling of Nomex® Honeycomb cores , linear and Nonlinear Behaviors, *Mechanics of advanced Materials and structures*, Taylor Francis, 14, 8, pp. 589-601.
- [7] Gornet L., H Ijaz, D. Cartié, 2008 A high cycle elastic fatigue damage model for carbon fiber epoxy matrix laminates, *International Journal Engineering Fracture Mechanics*, a paraître 2009.
- [8] Hexcel 1999 HexWeb^{TB} Honeycomb Attributes and properties, *Hexcel Composites*
- [9] Martin F, Alesandrini B., Gornet L., Markmann G., Roland P., Gilles Ollier Design Team, 2006 Conception d'un grand multicoque de course au Large : l'exemple d' «Orange II ». *Association Technique Maritime et Aéronautique*.
- [10] Petras A, Sutcliffe, 1999 Failure Mode Maps for Honeycomb Sandwich panels, *Composite Structures*, 44, 237-252.
- [11] Petras A, Sutcliffe, 2000 Indentation failure analysis of sandwich beams, *Composite Structures*, 30, pp. 311-318.
- [12] Zhang J., M.F. Ashby, 1992 The Out of Plane Properties of Honeycombs, *International Journal of Mechanical Sciences*, 35 (5) pp. 475-489.